

机械结构设计

3.1 地形结构元素分析

“RoboMaster 机甲大师赛”场地的地形每年都会有一定的变化,如 2016 年和 2017 年的公路 45°坡(见图 3.1)、2017 年的六边形障碍(见图 3.2)、2019 年的沟壑与飞坡(见图 3.3)、2024 年带有隧道的环形高地(见图 3.4)等。

参赛队需要考虑己方机器人在经过 45°坡、六边形起伏地面、飞坡以及通过隧道时可能出现的问题。例如,底盘太低,机器人无法经过 45°坡;底盘设计不合理,经过六边形起伏时整体震动大,运动不灵活;机器人整体强度差,无法经受飞坡带来的冲击;通过隧道时因机器人尺寸较大而卡在隧道中间等问题。虽然某些队伍在设计时确定了不利用场地的某些地形元素,但这样,步兵机器人的机动能力相对较差,作战时不够灵活。

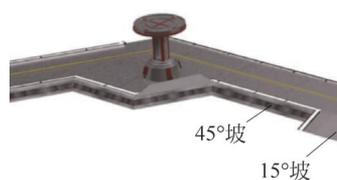


图 3.1 公路局部视图

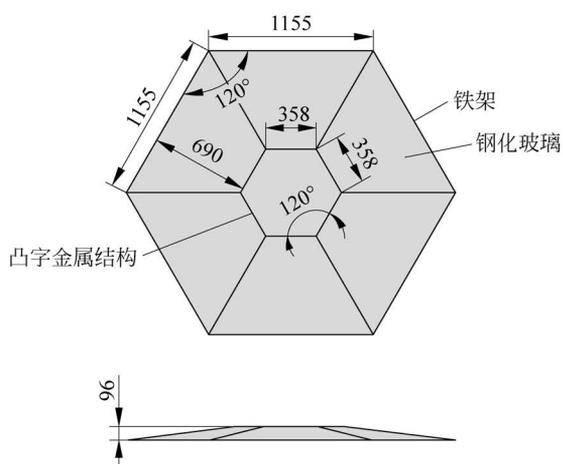
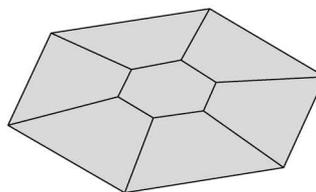


图 3.2 六边形起伏地面(单位: mm)



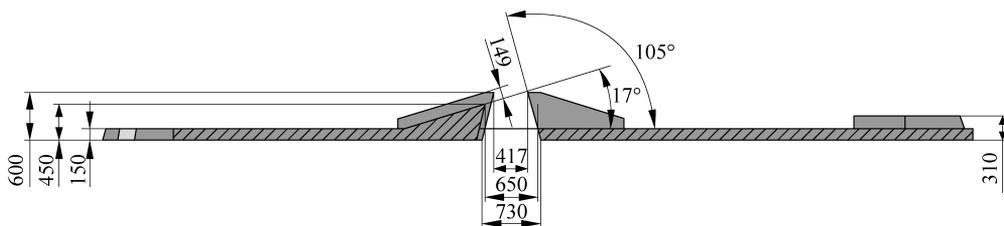


图 3.3 沟壑与飞坡剖视图(单位: mm)

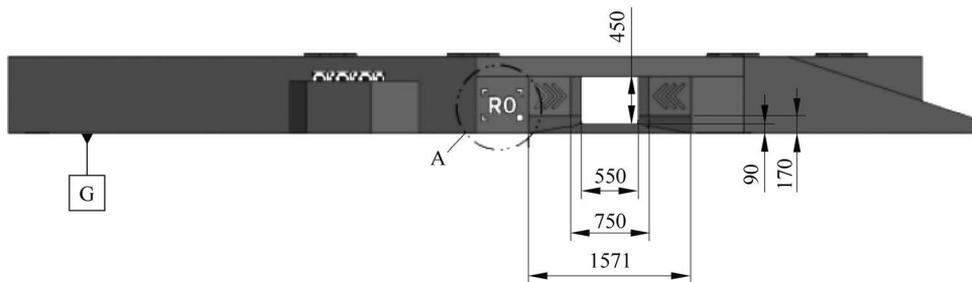


图 3.4 带有隧道的环形高地主视图(单位: mm)

3.2 底盘结构设计

3.2.1 灵活移动之轮组部分设计

在关于轮组的设计中,需要重点考虑轮系的设计,从电机轴到麦克纳姆轮的传动,采用传统梅花联轴器等会导致轮组整体所占空间较大,所以,一般采用 D 形孔法兰联轴器,如图 3.5 所示。

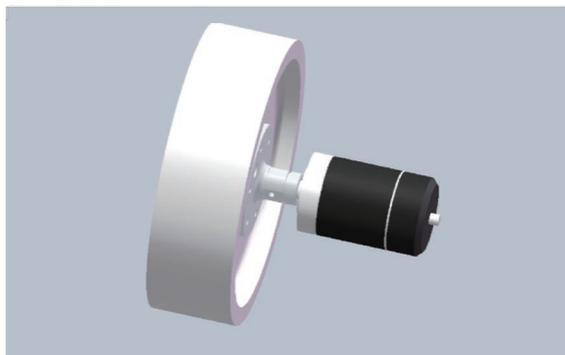


图 3.5 采用 D 形孔法兰联轴器轮系设计

还需要考虑到步兵机器人轮组是选择如图 3.6 所示的悬臂设计还是如图 3.7 所示的简支设计。悬臂设计的轮组由于整体结构具有一定的挠度,会导致麦克纳姆轮发生偏斜,也就是常说的外八,轮子倾斜会导致减少抓地力,对机器人的移动性能造成一定的影响。简支设计的轮组可以有效地避免这一问题,但带来的问题是,简支设计会给轮组带来一定的复杂性,质量上也会有一定的增加。

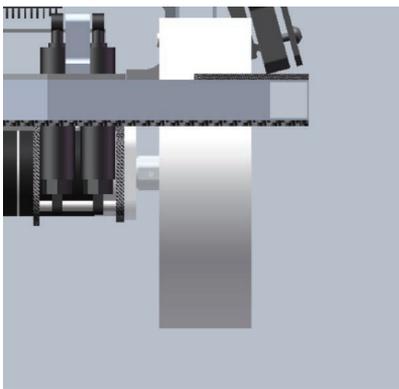


图 3.6 悬臂设计

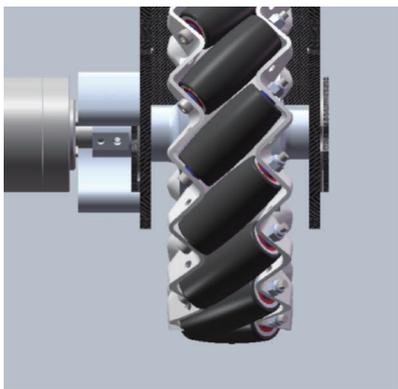


图 3.7 筒支设计

3.2.2 防止颠簸之悬挂设计

从 2019 赛季开始,步兵机器人对避震与越障的要求越来越高,使得步兵机器人的悬挂在设计中的比重越来越大。如图 3.8 所示,悬挂是底盘与电机轮组之间传力连接装置的总称,步兵机器人常见的悬挂元件有减震弹簧、阻尼器等。

悬挂对于步兵机器人来说,存在的意义主要有两个:一是为了适应赛场上复杂的地形,二是补偿加工装配误差。在 RoboMaster 赛场上,复杂的地形使得悬挂对于步兵机器人至关重要,各种斜坡的出现使得没有悬挂的机器人“寸步难行”,悬挂可以使机器人实现一定角度的斜向上坡,没有悬挂,机器人在斜向上下坡时,将出现轮子悬空的情况,同时,飞坡、台阶等场地元素对机器人底盘的减震性能也提出了很高的要求,悬挂可以有效地减轻飞坡等对机器人整体结构的刚性冲击,保护车体结构。

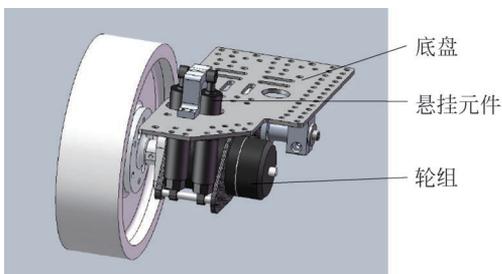


图 3.8 悬挂结构

悬挂分为独立悬挂和非独立悬挂。

独立悬挂,即 4 个轮子的悬挂独立,互不干扰。按其结构形式的不同,独立悬挂系统又可分为横臂式、纵臂式、多连杆式、烛式以及麦弗逊式悬挂系统等。悬挂大多都是由避震器、车架、轮毂等构成的三角形结构,以此来支撑车身。而这个三角形的朝向可以是任意的,可以垂直于轮毂平面,也可以平行于轮毂平面。在 2019 赛季,东北大学的步兵机器人采用的是平行于轮毂平面的三角形悬挂,这种方案的好处在于可以更好地节省空间与控制行程,便于设计步兵机器人的外部保护框架等。

非独立悬挂在进行越障时,由于悬挂并非独立,因此当某一悬挂进行形变时,会带动其他悬挂进行形变,这时整个车身会伴随悬挂进行某种程度的倾斜。参考越野车等采用非独立悬挂的大型车,由于整个车身都会参与越障,因此其越障能力会大幅提高,在步兵机器人以陀螺模式上下坡时可以保证整个车身的稳定性,但与之相对的就是操作手体验极差,也

会在某种程度上影响视觉识别。

在进行小范围越障时,独立悬挂往往可以保证车身的平稳性。参考现代汽车的悬挂系统,大多私家车都选择了独立悬挂,其关键在于汽车在经过小范围内的某些小障碍时,往往可以依靠悬挂本身来减轻车身的颠簸,使乘客体验良好。因此在2018赛季及以前,大部分步兵的悬挂大都采用此方案。但是由于2019赛季飞坡的加入,使得步兵机器人在进行飞坡时,对避震的要求较高,因此,避震器的弹簧将会相对较硬,而这种劲度系数较大的弹簧,在上下坡、下台阶时会表现得近似于不会压缩的支架,那么在这个时候,独立悬挂就不再适用于步兵机器人了。

解决这个问题的方法有两种。

一种方法是将悬挂的弹簧分为两段:一段弹簧较硬,用于步兵飞坡时的避震;而另一段弹簧较软,适用于步兵上下坡及下台阶时保持平稳。但是在这种情况下,每一次飞坡都会导致较软弹簧的疲劳,且由于飞坡时作用力较大,导致较软弹簧的一段无法保持良好的受力情况,容易损坏避震器,因此,这种方法不适用。

另一种方法是前面提到的非独立悬挂。参考越野车的越野原理,非独立悬挂对于大型障碍的翻越能力较强,因此,在设计时可以采取两种悬挂方案结合的方式,使步兵机器人适应不同的环境。一种思路是:非独立悬挂采用劲度系数较大的弹簧来保证飞坡时的避震,而独立悬挂采取劲度系数较小的弹簧,以此来实现步兵机器人的其他越障功能;另一种思路则相反。

3.2.3 又轻又硬之底盘骨架设计

底盘骨架作为安装其他部分的主体与在发生碰撞时的主要受力结构,应当设计出既轻又结实的结构来实现。

由于轮组及悬挂的存在,使其4个轮子上方应有较大的空间保证达到悬挂的最大行程,那么是否可以考虑十字形骨架的安装呢?当然可以,但是根据规则的限制,步兵机器人底盘上会安装装甲板,且会存在功率模块、电容、电池、裁判系统等组元,因此应使其有较大的空间来容纳这些。所以考虑采用井字形框架来实现这些。前面提到,悬挂的安装方式为平行于轮毂方向的三角形安装,所以,井字的左右侧枝将作为悬挂的一个支点。

同时轮子的悬挂行程与方向已经确定,因此可以很容易地在这个支架外侧安装一圈防撞保护,使其形成一种井字形结构,如图3.9所示,并在四角周围加上导轮以防4个角在墙边卡死。

制作底盘的另一种方案是制作立体骨架。在2019赛季,许多学校使用了立体骨架,当然其悬挂制作方式选择也会有所不同。但对于步兵机器人来说,底盘骨架的确定应根据需求来设计。其制作的主要思路在于让所有的主要承力部位由型材来承受,并且用板材,例如玻纤板、碳板等通过铆接将型材连接到一起,借此将所受力传递到整个骨架以分散力量。在装配时需要注意的是,在板材与型材铆接时,板材与型材中间不应留有空隙。如果留有空隙,则会对铆钉造成较强的剪力,而铆钉所承受剪力的强度并不高,会对整个骨架的强度造成影响。若型材与板材紧密贴合,则会有较强的摩擦力来承受整个骨架受到的冲击,会在很大程度上提高骨架的强度。

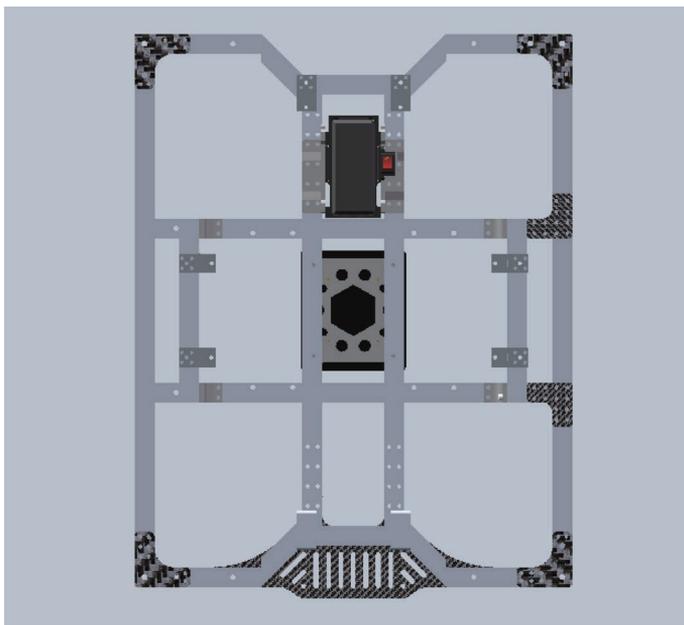


图 3.9 井字形底盘框架俯视图

3.3 供弹方式设计

3.3.1 概述

在 RoboMaster 赛场上步兵机器人供弹体系主要分为上供弹和下供弹两个类型,两种方案各有优缺点,同时在供弹机构的设计上也都存在许多可发挥空间。优秀的供弹机构是步兵在赛场上稳定发挥的保证,也是追求更高性能所必需的。本节将介绍在设计供弹机构时应注意的要点以及优化的方向。

3.3.2 供弹方式的选择

1. 上供弹

顾名思义,上供弹就是自上而下的供弹方式。对于步兵机器人即是将弹仓放置于步兵机器人的云台部分,拨盘机构与发射机构的供弹方式如图 3.10 所示。上供弹连接结构相对简单可靠,而各大高校的设计区别主要体现在弹仓的设计方式以及拨弹机构的设计上。本节不展开讨论(拨弹设计详见 3.5.3 节)。

上供弹体系集成度高、结构简单、卡弹概率小、弹丸利用率高、供弹效率高。但由于拨盘机构、弹仓、弹丸均集中于云台部分,所以通常会导致云台部分质量大,步兵机器人整体重心偏高。云台质量大会导致 Pitch 轴和 Yaw 轴电机负载大,影响电机响应速度;而机

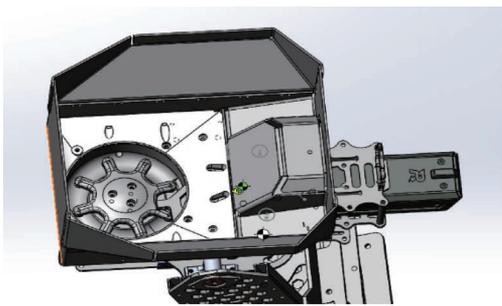


图 3.10 上供弹云台结构

器

机器人的重心偏高会增大步兵机器人在急加速、急减速、碰撞、上下台阶、飞坡时倾翻的概率。

2. 下供弹

下供弹即自下而上的供弹方式,其主要特点在于弹舱和发射结构分离。下供弹体系分为发射机构体、供弹链路(供弹管路)、拨盘机构3部分。下供弹通常是将拨弹机构固定于底盘,并通过供弹管路将弹丸供给于发射机构中,从而达到减轻云台负载的效果。

下供弹的云台部分质量小,因此转动惯量小,在相同的情况下电机的响应速度更快,且不会因为弹丸晃动、弹丸消耗导致云台部分质量和重心发生变化,云台更加容易控制且稳定,同时弹舱位于底盘往往可以拥有更高的载弹量设计上限,在弹舱的设计方面存在更大的发挥空间,步兵整车重心也更加贴近底盘,运动时更加稳定。

但是下供弹方案的结构复杂,设计难度大大增加,并且随着陀螺步兵机器人的兴起,陀螺下供弹步兵机器人在设计上具有一定的挑战性。

下供弹方案目前存在封闭软管供弹管路、开放式硬质供弹管路、封闭硬质供弹管路等类型。软管供弹即用软质管路作为供弹管路的方案,如图3.11中的步兵机器人采用波纹管作为供弹管路。软质供弹管路虽然结构简单,设计难度低,但云台转动时,软管需要随之变形,这个变形阻力是随机不均匀的,对控制有一定的不良影响;当软管弯曲曲率较大时,容易造成卡弹;云台的转动会导致软管长度发生变化,导致管路中的弹丸排列过紧或过松,影响弹丸的发射,甚至可能造成溢发(单发变多发)或者错发等不良现象。

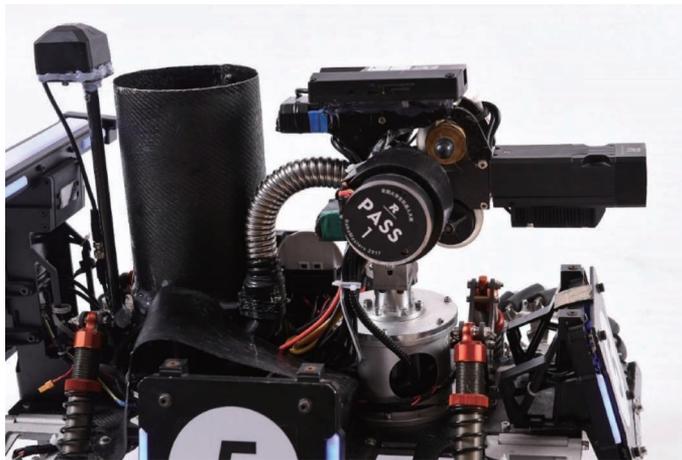


图 3.11 北京邮电大学步兵机器人

开放式硬质供弹管路如图3.12所示。在硬质供弹链路的基础上,在进入枪口处开口以适应Pitch轴的转动。供弹管路直接从Yaw轴直通上来,经过小弯曲后对准发射机构入口,供弹管路出口与发射机构入口没有物理连接(开口),因此是一个较长的悬臂梁。这个设计的优点是整个供弹管路90°转接头数量少、管路长度短,弹丸在管路内的运动阻力小;但是当Pitch轴俯仰角过大时,容易在开口处卡弹,卡弹严重时甚至导致Yaw轴直通上来的管路变形。

随着比赛技术的不断发展,机器人的综合稳定性在赛场上的作用越来越大,为了更好地适应赛场环境,提升机器人的性能,越来越多的队伍选择下供弹方案中性能上限更高的封闭硬质管路作为供弹方式。

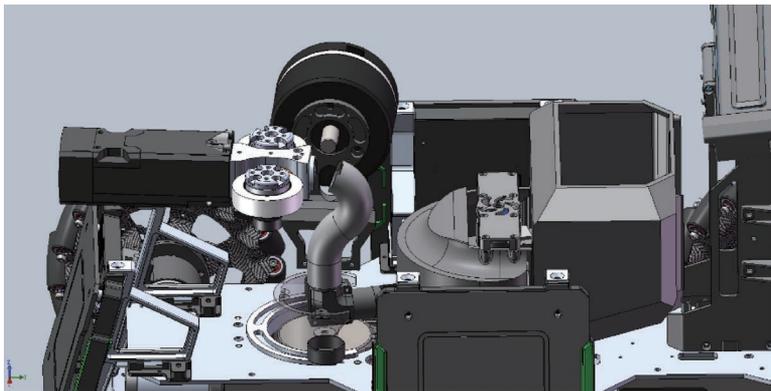
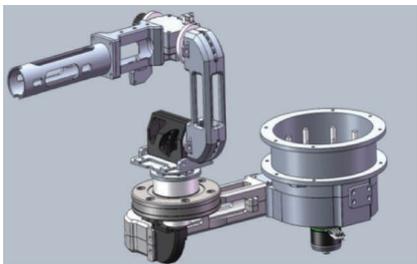
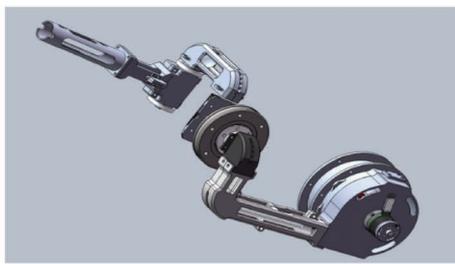


图 3.12 开放式硬质供弹管路

封闭硬质供弹管路如图 3.13 所示,使用封闭硬管供弹,弹丸从底盘的拨弹机构出来后,经过一段供弹管路到达云台 Yaw 轴正下方;经过一段 90° 转接头,通过 Yaw 轴中心上行,再经过一段链路后到达与 Pitch 轴电机同轴线的转接口,然后进入发射机构。



(a) 斜侧俯视图



(b) 斜侧仰视图

图 3.13 封闭硬质供弹管路结构

3.3.3 封闭硬质供弹管路的设计

下供弹设计的要点在于最大限度地减少供弹过程中产生的阻力,使得发射机构在满足一定射频要求的情况下不会出现卡弹的现象。在供弹过程中产生阻力的原因是多方面的,包括供弹管中弹丸的重力以及弹丸与管路内壁接触产生的摩擦力,以及加工误差和装配误差导致的阻力增加,同时一定要考虑供弹管路的保护和安装问题,切忌将供弹管路作为受力结构。压迫导致的管路变形对于供弹系统的影响都是极其显著的。下面从供弹管路材料、管径大小、管路连接处的设计、管路长度 4 方面介绍管路的设计。

1. 管路材料的选择

管路材料选择的原则是内壁尽量光滑,在资金充足的情况下,建议使用阳极氧化铝合金 6061 材料,采用 CNC 加工,同时可以做镂空处理以实现减重和防止异物堵塞。也可以使用 PLA 塑料(见图 3.14)或光敏树脂(见图 3.15)进行 3D 打印来实现管路的制作,光敏树脂材料相较于 PLA 更为光滑,精度较高,成型质量也比较好,但 PLA 胜在材料便宜且大多数参赛队伍有专门的打印机,且可以使用抛光液增加打印件表面的平滑度,同样能达到高性能供弹的目的。

除了这些直接成型的材料,还可以选择使用玻璃纤维板或者碳板等分别雕刻出供弹链

路的上壁、下壁、外环以及内环,通过拼接完成管路的制作(见图 3.16)。也可使用碳管作为输送管路(见图 3.17),在转接处使用打印件进行连接。以上方案同样能取得不错的效果。



图 3.14 材质为 PLA 的管路

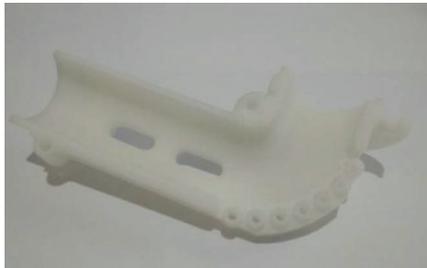


图 3.15 材质为光敏树脂的管路



图 3.16 插板拼接



图 3.17 碳管雕刻

2. 管径大小的选择

为了保证良好的弹丸通过性,应尽可能地使弹丸在管路中排列时弹丸球心的连线位于一条直线上,在转角处使弹丸尽量位于管路轴线上,如图 3.18 所示。比赛用小弹丸的直径为 17mm,弹丸直径和管路内壁直径均存在一定的加工误差,管径过小会导致部分弹丸受到管路内壁的挤压。如图 3.19 所示,管径过大会导致弹丸排列松散且没有规律,极易造成弹丸球心连线为没有规律的折线,传递的力一部分垂直于管壁径向,从而导致摩擦阻力增大,所以设计供弹管路时管径应适当大于 17mm,一般推荐使用 18mm 管径。

3. 管路连接处的设计

出于设计必要,供弹管路常常由多段管路连接而成,由于加工误差、装配误差的存在,设计管路时需要考虑连接处对心的问题。如图 3.20 所示的管路对心方案是一种常用的管路连接设计。

4. 管路长度的选择

在设计时,考虑到管路中的弹丸越多由弹丸重力产生的阻力越大,应尽可能地控制供弹管路的长度,减小拨弹机构所需要的拨动力矩。同时也要考虑模块化设计,方便拆卸,便于在出现问题时及时更改修复。

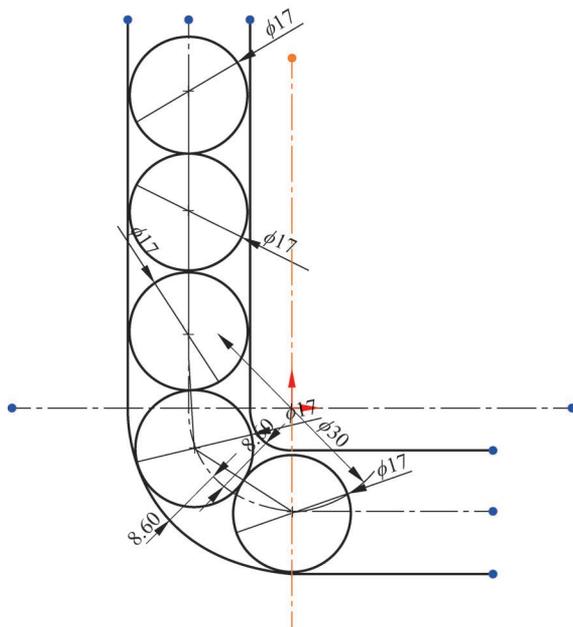


图 3.18 管径为 17.6mm 时弹丸球心连线示意图

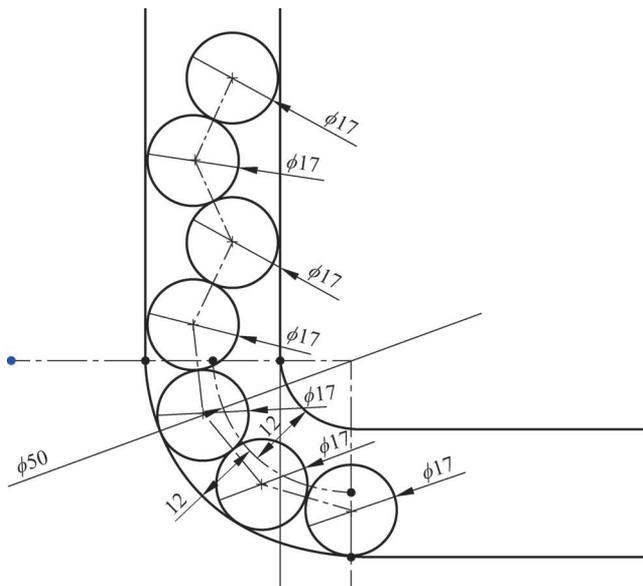


图 3.19 管径为 24mm 时弹丸球心连线示意图

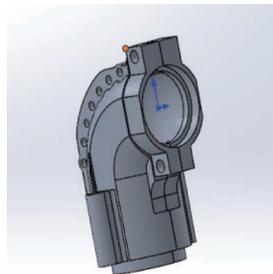


图 3.20 管路对心方案示意图

3.3.4 硬质供弹链路中轴承的使用

硬质供弹链路和其他供弹链路很明显的一个区别就在于弯道处的曲率,软管供弹往往可以让弯道弧线的半径变得很大,让拨弹机构提供的推力更集中地作用于弹丸的移动。而硬质供弹链路往往需要在弯道处让弹丸过弯前的速度矢量在与过弯后的速度矢量正交,也就是说,通常需要 90° 直角过弯,以保证弹丸能高效通过一些重要节点而不干扰云台、底盘

的正常运动。这些原因使得硬质供弹链路在弯道处曲率也变得很大,这就导致硬质供弹链路在弯道处弹丸阻力非常大,在不使用任何辅助过弹措施的情况下,弹丸在强行经过第一个弯道或者第二个弯道时就基本锁死,形成了类似机械自锁的效应,无论拨弹机构如何加力,也不能推动弹丸,甚至会损坏拨弹机构或者供弹链路。这种现象就是各参赛队都十分头疼的卡弹,是硬质供弹链路最常见也最致命的问题。

怎么减少弯道处的摩擦力,就成了开发硬质供弹链路非常重要的问题。目前最主流、最有效、应用最广泛也是相对比较成熟的技术就是将小型轴承嵌套在硬质供弹链路的弯道处,以滑动摩擦替代滚动摩擦,从而极大地减少弯道处的摩擦力,以提高供弹效率和供弹可靠性。下面将从轴承的选择、轴承嵌入方式、轴承嵌入位置 3 方面介绍。

1. 轴承的选择

目前弯道嵌入的轴承通常选用 $2\text{mm} \times 5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ (内径 \times 外径 \times 高)的深沟球轴承,如图 3.21 所示,其较小的尺寸便于嵌入供弹链路,同时有利于在一个弯道嵌入多个轴承,从而提高轴承嵌入密度,使弹丸通过路径更加接近于一个圆弧。除了尺寸外,值得一提的是,建议资金较为充足的团队选用效果较好的进口轴承。普通轴承拥有很高的性价比,而且在较低射频环境下表现也不错,不过在高射频、高压力环境下的表现不如进口轴承。



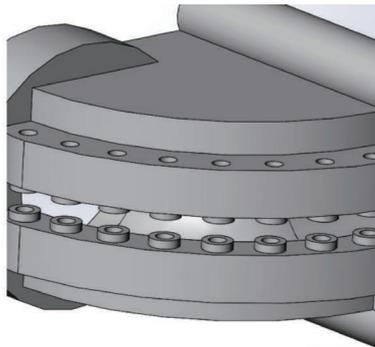
图 3.21 弯道用轴承

2. 轴承嵌入方式

轴承的嵌入方式非常多,理论上只要不影响轴承外圈转动就不会影响其性能。对于使用 3D 打印件构成的硬质供弹链路,由于材料本身强度较低,不建议直接在链路外围打印出圆柱体直接作为轴承的转轴,比较推荐的一种做法如图 3.22 所示,在外围打印出 $2 \sim 2.2\text{mm}$ 的通孔(具体尺寸视具体打印条件而定,能穿过螺栓即可),穿入 M2 的螺栓作为紧固件,同时作为轴承的轴。这样不仅供弹链路的强度有所保证,轴承也较为稳固。不过缺点在于装配较为费时,不便于维修。除此之外,还有嵌入钢轴作为转轴等方案,期待后续开发。



(a) 实物图



(b) 装配图

图 3.22 打印件中嵌入轴承的结构

3. 轴承嵌入位置

对于轴承嵌入的位置、数量何为最佳,这个问题尚无定论,而且这个问题的评判标准也非常多,这里只给出一些建议,以供开发参考。首先引用 2018 年末举办的 RoboMaster 圆桌会议第一期所分享的参数,如图 3.23(a)所示。使用这些参数,能连续通过 6 个弯道且不卡,还是很有学习参考价值的。现在许多使用的硬质供弹链路的方案也都与此类似。

此处说明几个比较重要的参数:相邻两轴承轴距、轴承覆盖角度范围、轴承嵌入轨道深度、弯道外圈平均曲率,方便继续探讨。

(1) 对于相邻两轴承轴距,一般情况下在保证轴承间互不干涉的情况下应尽可能小,如图 3.23(a)所示。当然,如果为了减少装配时间,降低成本和质量,适当加大轴承间距以减少轴承数量也是可取的。不过需要注意的是,切莫让弹丸能在轴承间隙中接触到轨道,如图 3.23(b)所示。而且弹丸距离管壁的最短距离最好不要小于 0.2mm,否则工艺误差或者装配误差以及形变误差都有可能直接导致弹丸直接摩擦管壁。

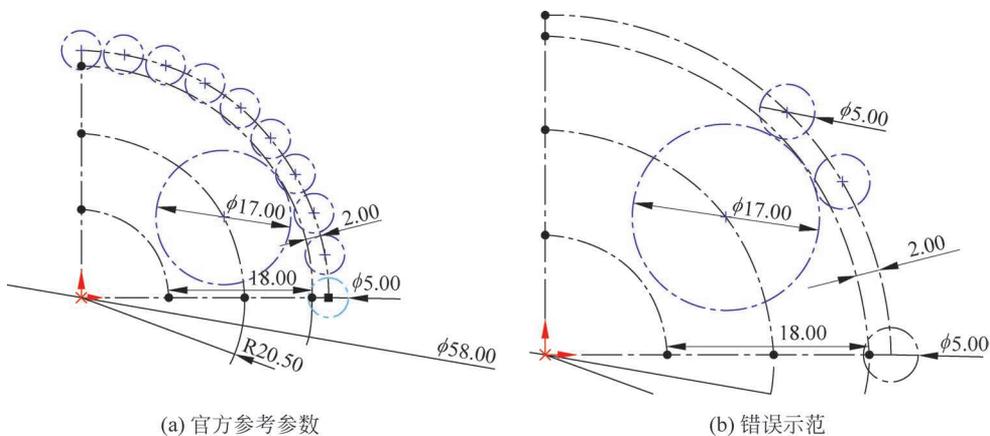


图 3.23 轴承嵌入位置图纸

(2) 对于轴承覆盖角度,一般情况下越大越好,甚至是在进弯之前就可以覆盖轴承。不过实测中即使没有弯道 90°完全覆盖轴承,也不一定不会对供弹造成较大影响,不过前提是供弹链路材料足够光滑。为保险起见,建议大家全范围覆盖轴承。

(3) 对于轴承嵌入深度 d ,实际上就是用轴承半径 r 减去轴承与弯道圆心的距离 D 和弯道外壁半径 R 的差,即

$$d = r - (D - R) \quad (3.1)$$

理论上, d 的值为 0.3~0.6mm 皆可,具体情况可能受到供弹链路设计强度、选材、轴承强度、弹丸材料等因素的影响,需要根据实际测试结果确定。

(4) 至于弯道外圈平均曲率,这个参数虽然理论上对供弹链路有一定的影响,但是实际设计的时候这个参数往往会受到机器人其他模块参数的影响,而且目前暂时还没发现这个参数过小或者过大对供弹的影响,就比如 RoboMaster 圆桌会议所分享的供弹链路外圈曲率为 2.387,使用的供弹链路外壁曲率为 1.976,还有使用更大曲率的弯道以压缩尺寸的供弹链路,同样也能实现高效通弹的效果,也许可以大胆地猜测,目前使用的大部分供弹链路弯道的曲率还没大到能抵消轴承润滑效果。值得一提的是,数据基本上是基于供弹弯道在 90°范围内,倘若有 180°弯的需求,不妨动手画一个 2D 图简单模拟一下弹丸间相互受力情

况再着手加工实测。

3.4 云台

3.4.1 云台概述

设计云台时需根据其实际功能和需求来决定其布局、重心、质量、刚度等,从而设计符合要求的机械结构。以“RoboMaster 机甲大师赛”2019 赛季为例,根据比赛规则的要求,步兵机器人云台的基本功能定位是:拥有 Pitch 轴(俯仰)和 Yaw 轴(左右)两个自由度、高精度发射弹丸和承载图像传输的系统。



图 3.24 云台结构布局示意图

在设计步兵机器人的云台时,需要先根据整体的设计要求设计其布局,然后分模块设计每一部分,布局可以在这时进行微调,最后优化图纸的所有细节部分。可以确定步兵机器人的云台结构布局,如图 3.24 所示。

此外,在接下来的设计中,应始终按照不违背整体的设计要求去设计每部分的机械结构,以下是部分可以用作整体设计要求的参考:由于比赛中操作手以第一视角操控机器人行进与打击对方,故传输比赛画面的图传模块和视觉自动打击用到的摄像头需要与发射弹丸的枪口始终保持相对静止,尽量与枪口高度保持一致,以带给操作手舒适的操作体验。

步兵机器人有飞坡的功能需求。为了提高飞坡的稳定性,需要在保证整个云台强度和刚度的前提下降低云台重心,防止飞坡带来的冲击载荷破坏云台的结构;为了满足步兵机器人跑得快、打得稳的设计需求,需在保证强度和刚度的前提下,使云台质量尽可能小;为了保证 Pitch 轴和 Yaw 轴的响应速度,设计时需要使云台的质量分布上做到尽可能对称。在平时调试、测试时,机器人可能会失去控制,俗称“疯掉”,为了在此状态下尽可能降低损失,需要在机械方面给 Pitch 轴和 Yaw 轴一个限位,使其运动范围始终在一个给定的范围内。

最后,在赛场上会遇到各种不可控的问题,导致需要维修机械结构。为了保证快速维修,需要设计各种精巧的结构以保证做到快拆和快装。

3.4.2 Pitch 轴结构设计

经过以上分析,可知 Pitch 轴的功能是为发射弹丸的发射机构增加一个俯仰的自由度。一般情况下,是将 Pitch 轴电机直接作为发射机构和框架的连接部件去设计 Pitch 轴,其布局如图 3.25 所示。

考虑到应当降低云台的重心,所以可以尝试着将 Pitch 轴电机的高度降低以满足这个设计要求。电机下置后需要有一个传动机构将 Pitch 轴电机的俯仰运动传递给发射机构,可选的传动机构有连杆传动、齿轮传动、同步带传动等。传动机构最关键的是不能有空程现象,即在电机不转的情况下,发射机构不能因为传动机构内机械零件的装配间隙产生运动。Pitch 轴传动有空程会给控制方面造成很大的困难,严重时会导致云台不停地上下振动。整体布局如图 3.26 所示。

图 3.27 为东北大学 T-DT 战队步兵机器人采用的 Pitch 轴连杆传动方式,设计该传动机构的关键在于上下旋转中心的一致性和轴承与连杆的配合处、轴承与机加件的配合处无明显空隙出现。

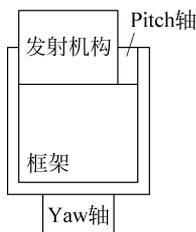


图 3.25 考虑 Pitch 轴的云台结构布局示意图

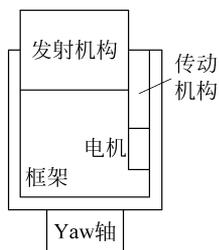


图 3.26 考虑传动机构的云台结构布局示意图

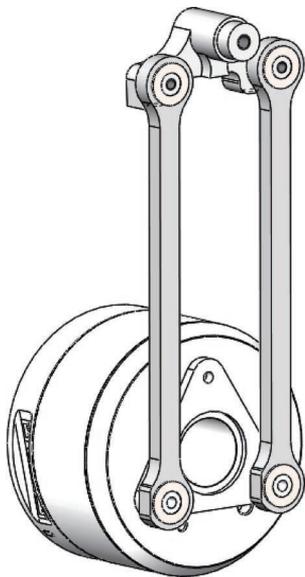


图 3.27 Pitch 轴连杆传动结构图

需要注意的是,Pitch 轴电机的放置位置,在条件允许的情况下最好放在 Yaw 轴的旋转中心上方。若不在该位置,则在 Pitch 轴电机启动的一瞬间会产生惯性力使云台绕着 Yaw 轴旋转,有可能在那一瞬间造成控制信号的通信失误,导致机器人失控。

3.4.3 Yaw 轴结构设计

在步兵机器人的设计中,Yaw 轴连接底盘和云台,使云台可以在水平面上左右转动。在步兵机器人复杂的底盘运动中,Yaw 轴决定着云台的稳定性,并且在遇到撞击或者飞坡落地时,大部分的冲击载荷需要 Yaw 轴承受,故 Yaw 轴的刚度在云台设计中属于重中之重。在赛场上,部分学校的步兵机器人云台“断头”便是 Yaw 轴刚度不够造成的后果之一。

最简单的 Yaw 轴设计便是将电机直接作为 Yaw 轴来设计使用,这样的设计在机械结构上足够简单,质量也可以做到最轻,但是在较早赛季的比赛中,这样的设计使 Yaw 轴电机承受了大部分的冲击载荷,对 Yaw 轴电机的损害较大,并且在比赛中有很大概率出问题,所以设计者应该根据实际需求去设计自己的机械结构。图 3.28 为 ICRA 官方车的 Yaw 轴实物结构。

所以为了保护 Yaw 轴电机和提高云台的稳定性,需要使 Yaw 轴电机承受的力和冲击载荷尽可能小,即需要由其他零件代替其承受冲击载荷。考虑到其旋转的运动方式、云台质量和成本,可以选用合适尺寸的轴承来作为替代品,如深沟球轴承、转盘轴承等。使用轴承时,一般会让轴承外圈与支撑 Yaw 轴的地方固连,使电机、轴承内圈以及上方的框架固连,如图 3.29 所示。



图 3.28 ICRA 官方车的 Yaw 轴实物结构



图 3.29 Yaw 轴结构图

3.4.4 滑环 Yaw 轴设计方法

近两年在赛场上步兵机器人出现了一种名为“陀螺”模式的运动方式,其具体表现为云台上的枪口始终指向打击目标,底盘可以绕着云台原地 360° 旋转来躲避对方的打击,有的队伍还设置了旋转速度随机改变的陀螺模式来躲避对方机器人的视觉瞄准。能够做出陀螺模式的关键是一个通电器件——滑环,如图 3.30 所示。

滑环也称作旋转电气接口、电气旋转关节。滑环的作用便是为旋转体连通、输送电流和信号,通常安装在设备的旋转中心。当步兵机器人在战斗中开启陀螺模式时,通过滑环将在底盘上电池的电力输送进入云台,可以避免底盘通向云台的导线缠绕打结。滑环有多种型号和尺寸,应根据实际情况选取合适的型号和尺寸,在 2.3.1 节中已选取的 Yaw 轴电机 GM6020 为空心电机,合适尺寸的滑环可直接放入其空心孔中。当选取的电机和滑环无法采用可以同时放在 Yaw 轴的设计时,一般会选择将滑环放在 Yaw 轴所在位置,而将 Yaw 轴电机偏置的方式来设计合适的机械结构,如图 3.31 所示。



图 3.30 导电滑环

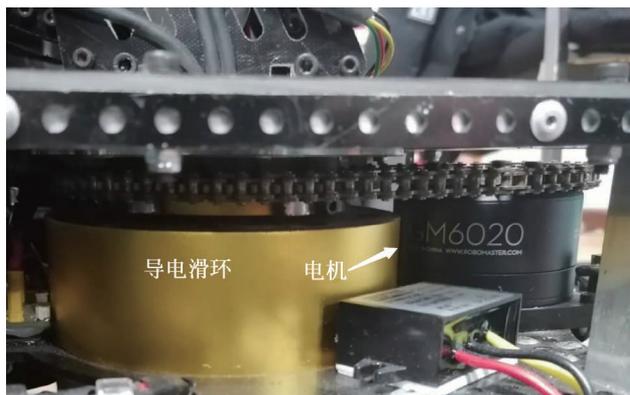


图 3.31 Yaw 轴电机偏置

3.5 发射机构

3.5.1 发射机构概述

发射机构的功能为顺畅地发射弹丸,并具有较高的准度,最理想的准度效果是做到“指哪儿打哪儿”。在比赛中,发射机构的准度至关重要,它涉及步兵机器人打击能量机关获得整体兵种战斗增幅以及无人机打击基地等功能的实现,同时打击精度高的机器人的操作体验会更好。

对于准度的概念,需要强调弹丸的准度由弹丸的密集度和弹丸落点距离目标的偏差组成,也就是说,当发射机构的枪口对准目标后,多发弹丸的落点的密集度很高,但是都偏离目标较远,和多发弹丸的落点的平均中心与目标重合但是密集度很低两种情况,都可以视作准度不高,因为这两种情况命中目标的弹丸数量都不多。之所以要将准度分为这两部分,是因为根据实践检验,机械结构对弹丸的密集度影响很大,偏离目标的距离与视觉的算法关系更大。对于弹丸的密集度,可以通过机械结构尽量使每一发加速后弹丸的速度(大小和方向)一样,如此最终所有弹丸的密集度必然会很高。

刚开始时,只需要设计一个能顺畅发射弹丸的发射机构,至于发射机构的准度则需要现有的发射机构上进行分析,然后逐步改进。发射机构的分析与改进过程会按照如图 3.32 所示的流程排布。

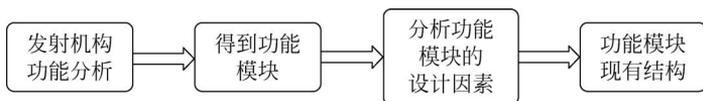


图 3.32 发射机构的分析与改进过程流程图

故抛开发射机构的准度因素,粗略地分析发射机构的功能可知,发射机构的组成必然包括如下功能:

- (1) 弹仓——从官方得到弹丸后的储存装置;
- (2) 拨弹装置——将弹仓中的弹丸送至发射机构的装置;
- (3) 发射动力——提高从弹仓送出来的弹丸的速度;
- (4) 枪管——挂载测速模块,一定程度上限制弹丸;
- (5) 预置——防止弹丸与发射动力模块误触,造成流弹。

发射机构整体布局大致如图 3.33 所示。

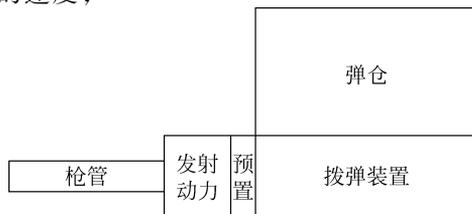


图 3.33 发射机构整体布局

3.5.2 枪管设计

枪管主要起支撑官方的测速模块和指定弹丸所打击方向的作用,与此同时,由于枪管是弹丸发射后的路径中的一段,所以在一定程度上会影响弹丸的散布范围。其设计参数包括枪管的内径大小、枪管的长度以及枪管内壁的粗糙度等。

对于枪管内径,根据比赛规则,弹丸的大小为 $16.8 \pm 0.2\text{mm}$,测速模块的内径为 21mm ,故大部分学校采用的枪管内径大小为 17.5mm 或 18mm ,若内径过小,则有较大概率出现卡弹。

对于枪管长度,有两种设计思路。一种为使用短枪管,使弹丸尽量不碰到测速模块内壁。如图 3.34 所示,在测速模块内径为 21mm 、枪管内径为 18mm 、弹丸射速为 25m/s 的情况下,若使用短枪管,经过理论计算是很有可能出现弹丸不碰壁的情况的。

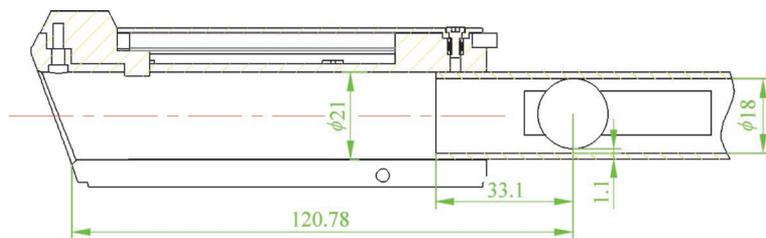


图 3.34 发射机构 2D 图纸

另一种为使用长枪管,弹丸虽然在内壁中碰撞,但是终究是在一个直径很小的范围内,有利于限制因弹丸初速度方向不同造成的落点散度,目前两种方案并未进行详细的测试比较,需读者根据自身情况选择设计方案。

对于枪管内壁的粗糙度,其越小对在枪管内碰撞前进的弹丸影响越小。粗糙度与材料种类、加工工艺都有较大关系。大部分学校采用铝管氧化发黑加铣削的方式,还有部分采用碳管加铣削的方式,效果都很好。两种方案的目的在于降低枪管的粗糙度。此外还有一些其他降低枪管粗糙度的方案,例如,尝试在枪管内部刻膛线,使用 3D 打印的枪管并进行细致打磨等,都有不同的效果。

3.5.3 拨弹机构设计

拨弹机构的功能是将弹丸顺畅地送入发射机构。顺畅表示无卡弹、无空弹现象。考虑到高射频的要求,采用电机作为拨弹动力源,且需要有几发弹丸一直处于随时待输送的状态来降低卡弹、空弹现象出现的概率。

在拨弹机构的设计过程中,必须经过大量的测试,在实际情况中观察拨弹机构的缺陷,思考原因,寻找解决办法,然后优化自己的装置。

目前使用较为普遍的拨弹机构有两种类型。

第一种如图 3.35 所示,这种平面拨弹机构的拨叉的 8 根齿之间存在弹丸,发射时,这些弹丸是不会有卡弹情况出现的,若未填满则会出现空弹现象。该装置功能的上限取决于弹丸落至两根齿之间的效果,由于齿与齿之间的空间较小,在拨叉转速达到某一值后,弹丸在重力作用下进入两根齿之间的概率极低,导致射频被限制。当然可以在设计时使用齿数更多的拨叉和增大齿与齿之间的空间以获得更小的空弹概率,但同时也会增大拨弹装置的体积,为整个云台的设计带来更大的困难。

在此基础上,为了达到更高的射频要求(例如,比赛中无人机需要在 35s 内发射 500 发弹丸),改进出了如图 3.36 所示的第二种拨弹结构。改进第一种拨弹机构的思路在于提高落弹概率和增大齿与齿之间的空间。若继续增大拨盘面积会给整体云台的设计带来极大

的负担,故第二种拨盘采取分层的办法增大齿与齿之间的空间,采取在拨叉上增加搅拌弹丸的圆柱体的办法提高落弹概率。

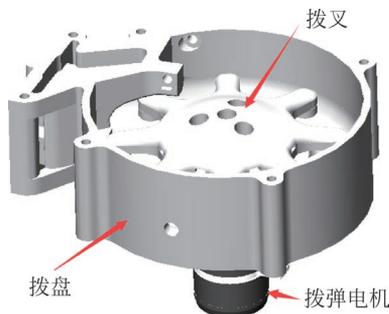


图 3.35 平面拨弹机构

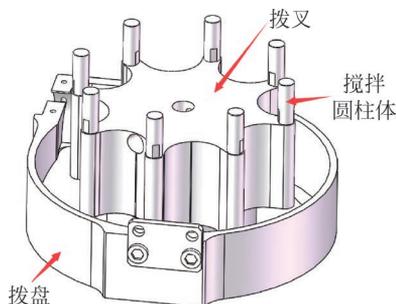


图 3.36 分层拨弹机构

3.5.4 摩擦轮动力的设计

发射动力的功能是提供弹丸发射所需要的速度,可以选择的动力源有气缸、橡皮筋、带有摩擦轮的电机等,考虑到比赛中高射频和机器人整体质量等多种因素,目前在赛场上使用范围最广的动力源是摩擦轮发射。使用摩擦轮发弹的原理如图 3.37 所示,弹丸经过高速旋转的摩擦轮时,由于摩擦力的作用,弹丸的速度被提高,直至弹丸经过另一侧被发射出去。比赛中,摩擦轮是一直高速旋转的,需要发射时,只需要后方的拨弹装置提供动力,便可将弹丸发射出去。

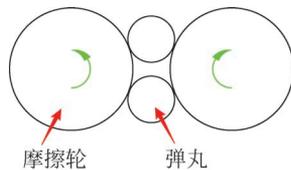


图 3.37 摩擦轮发射弹丸原理

由摩擦轮发射机构的运作过程可知,其设计参数与弹丸发射时的初速度、最终的射击精准度有很大的关系。在此,以使用广泛的聚氨酯摩擦轮为例介绍摩擦轮的设计参数,包括摩擦轮的硬度、质量,摩擦轮电机的转速,两摩擦轮之间的间距等。

对于两摩擦轮的间距,由于要通过摩擦力提升弹丸的速度,两摩擦轮之间的间距必然要小于弹丸的直径,所以在挤压过程中弹丸和摩擦轮必然会有一个产生较大的变形。并且由于摩擦轮的加工等,摩擦轮实际不是标准的圆形,加上机构的振动,弹丸的速度不可能做到稳定不变,只能尽量提高加工精度使弹丸速度稳定在一个较小的范围。总之,摩擦轮的间距与弹丸速度的稳定性有很大关系。

对于摩擦轮的硬度,根据官方的规则手册,弹丸的邵氏硬度为 90A,选择让摩擦轮产生较大变形,需要摩擦轮的硬度低一些,目前已知参赛队伍的硬度选择都在邵氏硬度 45A~65A,摩擦轮硬度小,其耐磨性也会小。在与弹丸相对转动的过程中,其掉渣磨损现象严重,需在使用一段时间后更换;若摩擦轮硬度过大,则在弹丸经过摩擦轮的过程中,挤压力过大,摩擦轮电机将会承担更大的径向负荷,电机的稳定性被破坏,使用时间较长后甚至会损坏电机。

对于摩擦轮的转速,摩擦轮的转速越快,弹丸的速度也会越大,其速度在水平面的分量会相对增大,从而在打击同一距离的目标时,弹丸在垂直方向的位移减小,弹丸的落点会更集中。比赛规则规定,小弹丸的射速不能超过 30m/s,否则会扣除自身血量。所以为了适

应比赛规则,摩擦轮的转速应当稳定在一个较小的范围内,即摩擦轮发射弹丸速度降低后能够在短时间内回到设定速度。为此,大部分学校采用闭环控制摩擦轮电机。所谓闭环控制,是在电机外加传感器,在摩擦轮电机运转期间测定其转速,发现其速度低于设定值时,将会通过程序控制,使其快速回归至设定速度。相应地,开环控制无反馈传感器,摩擦轮掉速后,相对于闭环需要更长的时间回归至设定速度。

对于摩擦轮的质量,在开环控制情况下,当一发弹丸经过摩擦轮提速射出后,摩擦轮的转速会降低,会影响下一发弹丸的姿态,但是转动惯量大的摩擦轮速度降低得少,在高射频下对于下一发弹丸的影响程度小一些。同样,质量轻的摩擦轮掉速多,影响较大。但是在闭环控制下,摩擦轮的转速会被稳定在一个固定值附近,摩擦轮掉速后,经过反馈,会立即重新达到设定速度。在回速阶段,转动惯量大的摩擦回速较慢,转动惯量小的摩擦轮回速较快。此外,质量过大的摩擦轮也会给云台轴电机的响应带来一些影响,给云台的配平也会带来一些问题。在确定摩擦轮是否满足要求时,应当具体情况具体分析,如根据自身射频的要求、电子调速器的性能等,观察摩擦轮的速度反馈曲线,若在射击下一发弹丸之前,摩擦轮速度已经回升稳定,即为满足所要求。

总之,摩擦轮的材料、参数的确定最终都是为了控制弹丸与摩擦轮接触时摩擦力的稳定,此外影响因素还有很多,例如,摩擦轮的温度、空气的湿度等,需要读者自行探索。

3.5.5 预置机构的设计

预置的功能在于阻碍还未发射但即将发射的弹丸靠近摩擦轮,即所谓的“走火”,故预置机构的位置尤其重要。当其位置距摩擦轮较近时,很容易由于机器人运动中的颠簸和碰撞等发生流弹现象;其位置距摩擦轮较远时,机器人的发弹延迟会很大,贻误战机。发弹延迟指操作手单击鼠标发射弹丸到弹丸真正发射出去这段时间的长短。

在参赛队伍中,预置机构的设计多种多样,各有特色,在此介绍两种方案。

(1) 在人工智能挑战赛的官方步兵机器人中,采用微动开关作为预置机构,其思路便是使阻碍弹丸的力很小,如图 3.38(a)所示。

(2) 图 3.38(b)为西安交通大学笃行战队在赛季中采取的预置方案,其预置的设计思路是控制弹丸在经过摩擦轮时与枪管保持同心状态,故在枪管的上下都设计了凸台结构,即起到调节弹丸姿态的作用。

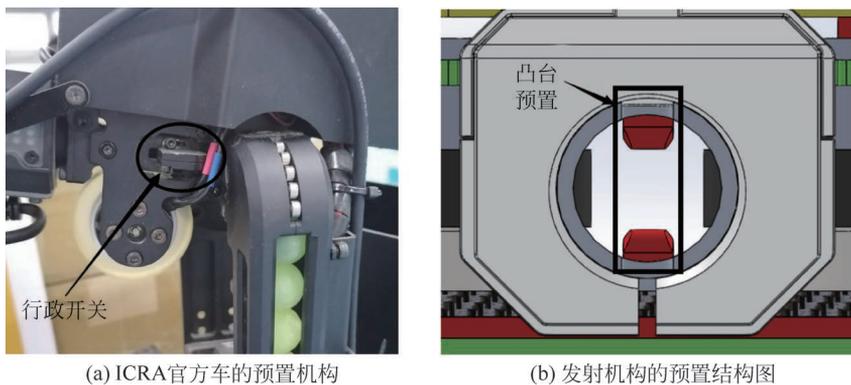


图 3.38 预置机构的设计

在实际设计过程中,可通过图纸粗略计算拨弹电机将弹丸拨送至发射位置的时间,从而估计发弹延迟的时间,制作出机构后,通过官方提供的软件读取正确的发射延迟时间,进行测试调整。

3.5.6 弹仓设计

弹仓的功能为存储弹丸和接住落弹口的补给,故要求弹仓的容量要大于比赛中所需弹丸的体积,弹仓的接弹口需要尽量大以包容接弹时机器人的定位误差,并且考虑到在比赛中步兵机器人有飞坡的功能需求,弹仓需要增加弹仓盖以防止其在飞坡时丢失弹丸。

弹仓的形状需在枪管、拨弹机构以及发射装置设计完毕后,根据实际空间去确定。弹仓的加工可以选择打印、板材拼插或者用 PC 折弯等方式。以如图 3.39 所示的东北大学步兵机器人弹仓设计方案为例,因为需要加弹仓盖,所以需要在稳定的地方固定控制弹仓盖的动力源,且比赛中需要防止弹仓被对方的弹丸打坏,故选择板材拼插和折弯的方式进行设计和加工。在折弯设计过程中,可以利用 SolidWorks 中的钣金功能。

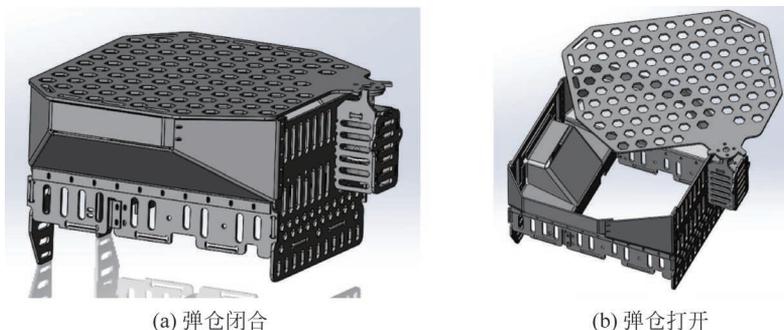


图 3.39 东北大学步兵机器人弹仓

在电影的枪战画面中常会发现一个现象,那就是手枪打出弹丸后会有后坐力,我们的发射装置也会有后坐力,从而造成发射一发弹丸“抬一次头”的现象。造成这种现象的原因是在摩擦轮将弹丸射出后,由于相互作用力,弹丸会给发射机构一个向后的力 F_1 ,同时 Pitch 轴为了阻止其向后运动会提供一个等大的反向力 F_2 , F_1 与 F_2 构成一对力偶,使发射机构“抬头”,如图 3.40 所示。为了避免这种现象的出现,则需要消除这对力偶,即使枪口的中心轴与 Pitch 轴的旋转中心轴在同一个面上。

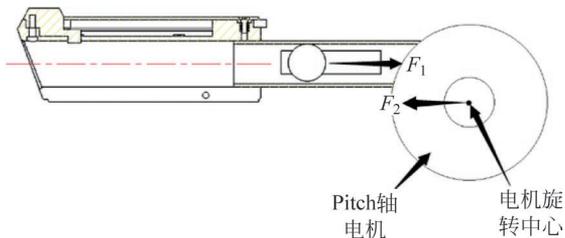


图 3.40 弹丸发射时受力分析示意图

3.6 外观保护设计

3.6.1 外观保护壳

外观保护壳是集保护与美观于一体的重要设计部分,包括云台与底盘的保护壳两部分,以下分别进行介绍。

1. 云台保护设计

云台部分的外观保护壳主要有以下几方面。

(1) 保证云台上的电控硬件部分不会被对方射出的弹丸破坏,由于陀螺仪需要置于 Pitch 轴和 Yaw 轴的交点,为集中放置,电控硬件一般连接在云台承载板下方,在此处加上密闭的保护,如图 3.41 所示为硬件保护板材。

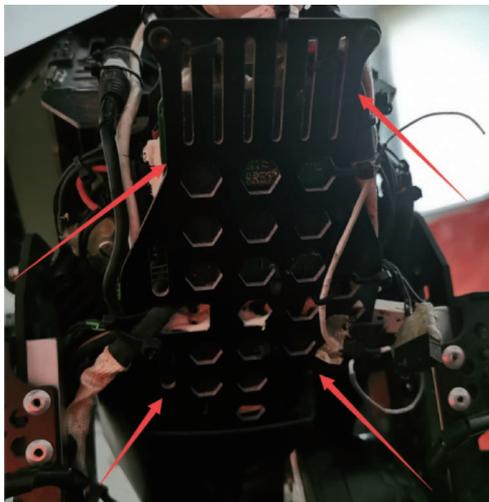


图 3.41 硬件保护板材

(2) 防止对方的小弹丸射入摩擦轮模块卡死电机导致步兵无法发射弹丸,如图 3.42 所示为摩擦轮保护板材。



图 3.42 摩擦轮保护板材

(3) 弹仓上部采用相对于中线向外倾斜的锥形钣金结构,以扩大补弹时进弹的面积,同时也使得云台更加美观,如图 3.43 所示为弹仓外观。



图 3.43 弹仓外观

在实际设计时要考虑电控硬件部分的走线进行布局,尽量使外观流畅美观。云台保护通常以 PC 板为主(PC 板的详细信息见 2.3.2 节)。PC 板的硬度大,轻薄美观,与云台保护设计的要求相适应。

2. 底盘保护设计

底盘部分保护外壳主要有以下几方面。

(1) 在 4 个轮子的上方应当具有密闭的保护,保证底盘上的电控硬件部分不会被落下的弹丸砸到,在装甲板与云台的空隙中应当留有保护,其目的在于保护控制硬件与走线部分,如图 3.44 所示。



图 3.44 空隙保护

(2) 保证小弹丸或者大弹丸不会进入轮组而卡死电机与轮子,如图 3.45 所示。

(3) 由于装甲板是主要受击打的目标,所以经常会有弹丸发射到邻近的其他部位。采用可以吸收冲击的薄泡沫板,能保证在面对多次弹丸击打后不会产生剧烈破坏,因此可以作为保护的参考材料,减少机器人在对抗中受到的碰撞损害,如图 3.46 所示。

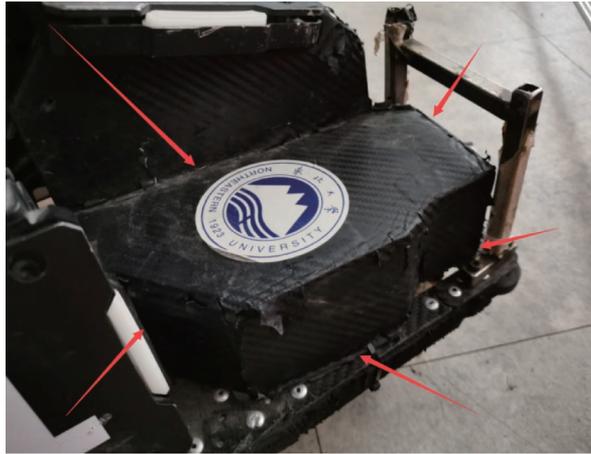


图 3.45 轮组保护



图 3.46 薄泡沫板

(4) 最后,外壳的设计应当具有美观性,通常可以将不规则、不好看的部分遮挡起来(官方设立有最佳外观奖),从而可以从气势上压倒对手,如图 3.47 所示。



图 3.47 美观设计

部分学校选择使用 PC 板作为保护,这种保护更轻、更美观,但相应地,它的保护性能更差一些,吸收冲击的能力较泡沫板更弱,且容易折断,通常作为云台的保护材料。在实际设计时,应当根据具体的控制硬件布局及救援机构与装甲板的安装、轮组悬架的行程来综合考虑保护的位置与大小。

3.6.2 被救援机构

从外观角度考虑,机器人功能的重要性大于外观,不能舍弃功能求外观。被救援机构在 2018—2021 赛季是机器人在战场阵亡的重要需求结构,应该留有足够让工程机器人救援所需的活动空间。

由于后续赛季中,机器人可以直接在阵亡地点复活,救援这一任务在比赛中的重要性逐渐降低。但机器人在本方复活点复活的时间要小于原地复活所耗费的时间,因此应根据本队技术能力和战术安排合理设计救援机构与被救援机构。

根据早期规则,步兵机器人在阵亡后可以由工程机器人进行救援。在救援过程中步兵机器人需要与工程机器人发生固连。而由于规则上对固连与步兵机器人底盘功率的限制及步兵机器人自身的尺寸、质量需求,一般将步兵机器人设计成被动连接,而由工程机器人机械手臂对步兵机器人进行抓取。通常来讲,步兵机器人的救援机构部分通常设计在底盘框架上(见图 3.48),使其与底盘形成完整的一个整体,以此来保证机器人在被拖动时的强度。

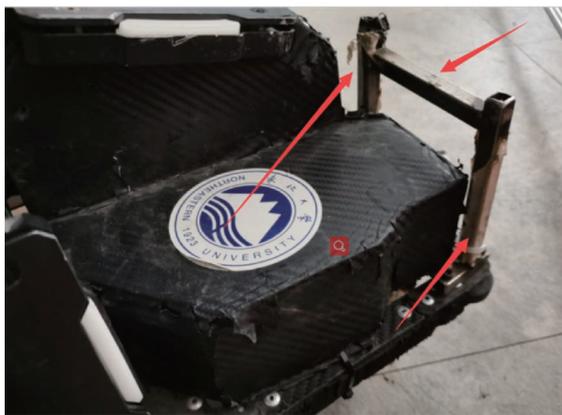


图 3.48 被救援机构

在 2019 赛季,大部分学校的被救援机构都被设计成了简单的框架型结构,并通过高强度螺钉或者焊接的方式,将其固定在底盘上。在选择救援机构的材料时,应考虑以下几点。

(1) 质量、与框架部分连接的强度及美观度。以东北大学为例,之前曾经制作过铝制支座加碳管的方式来安装救援机构,但在后期实战中发现,不管是支座还是碳管,在比赛中都有被破坏的可能。所以最终选择了钢型材来保证救援的强度。在救援机构的尺寸设计上,由于工程机器人同时担负着救援步兵机器人和英雄机器人的任务,所以在设计时,应当与三方机器人的设计者协同好。但由于在设计初期为了测试机构的可用性而忽略救援机构,所以应在设计初期为救援机构预留足够的设计空间,避免在后期对底盘布局有较大的变动。

(2) 救援部分在某种程度上也是步兵机器人的一种保护,同时由于在比赛中可能受到大弹丸的击打与撞击,因此救援部分与底盘骨架的连接处是整个救援的危险点,应当进行着重加固。而其他地方承受的应力不会太集中,所以在设计上可以为了质量与美观而让步。当然具体受力可以通过使用有限元分析功能计算出来。

还有一种方案是:救援机构直接抓取底盘框架。那么这种方式在上述具有外边框的底盘框架中较为适用。需要注意的是,步兵机器人底盘较英雄机器人底盘会低一些,因此若无法协同两者的外形尺寸,将对救援造成部分影响。同时,这种方案会造成底盘框架的外边框尺寸较大,从而降低步兵机器人底盘的可用有效面积,有得不偿失的可能,因此不建议选择这种方案。